

Хаотические модели деградации лёссов

Т. П. Мокрицкая

Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара
49044, Украина, Днепропетровск, пр. К. Маркса, 36
e-mail: mokritska@i.ua

Аннотация. Приведены некоторые результаты анализа временной изменчивости компонентов геологической среды на территориях городов, указывающие на присутствие элементов хаотического состояния в динамике свойств грунтов и динамике подземных вод на застроенных территориях. Проанализирована изменчивость свойств лёссовых пород в период 1926–2007 годов на территории крупных и небольших городов Приднепровского промышленного региона Украины.

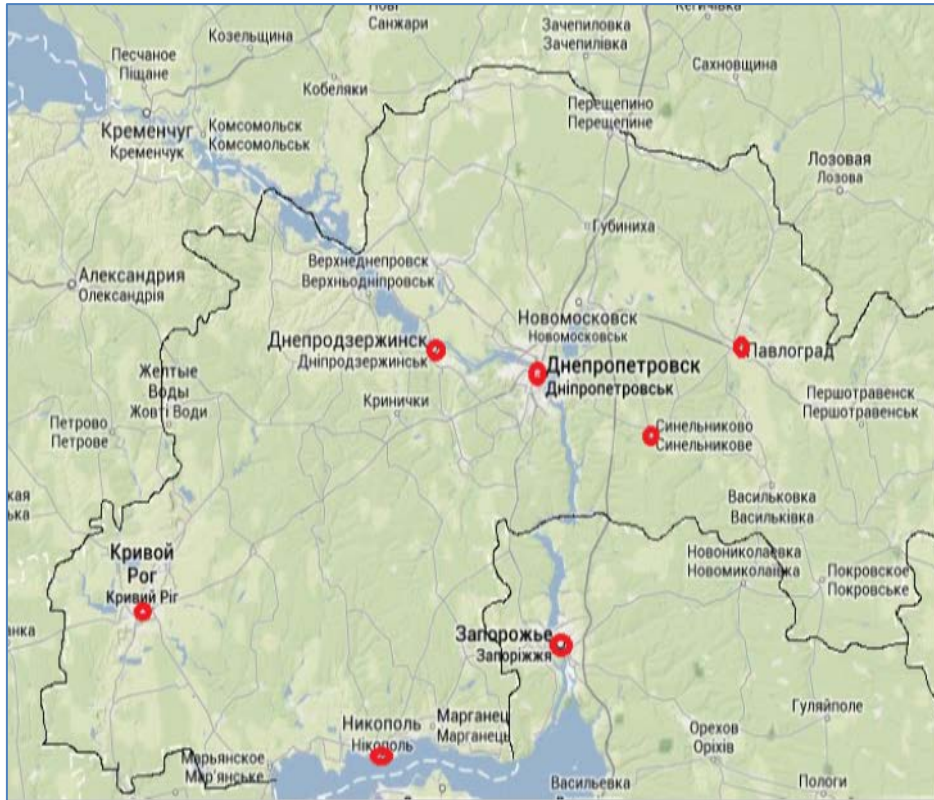
Ключевые слова: лёсс, деградация, хаос.

1. Вступление

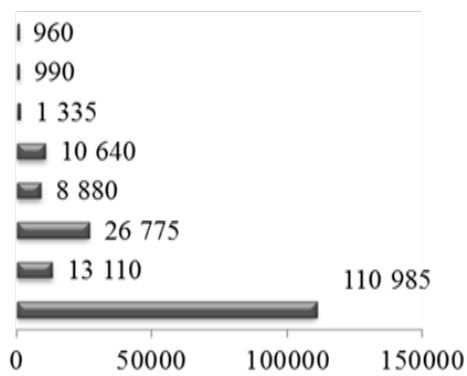
В условиях многофакторных внешних воздействий в зоне влияния города происходит изменение свойств горных пород, в частности, деградация просадочных свойств массива (Ю. М. Абелев, А. К. Ларионов, В. Ф. Краев, В. Т. Трофимов и др.). Скорость деградации просадочности (В. И. Коробкин) определяется внешними (техногенными) и внутренними (природными) факторами. Длительная деградация просадочных свойств массива при интенсивном техногенном воздействии влияет на уязвимость (В. И. Осипов) геологической среды.

Произвольный выбор мест для строительства новых зданий и сооружений на территориях городов приводит к тому, что в зону их влияния вовлекаются участки, неодинаковые по степени измененности. Сезонная и многолетняя цикличности изменения уровня подземных вод на однотипных территориях с устойчивой тенденцией к подтоплению нарушается, изменяется частота и длительность ритмов. Переход от порядка к хаосу сопровождается необратимым изменением компонентов, в частности, свойств и структуры грунтов. Действующие методики оценки состояния компонентов в природных и техногенных условиях основаны на использовании модели однородной случайной величины, не отражают необратимость и направленность изменений.

Проанализирована изменчивость свойств лёссовых пород в период 1926–2007 годов на территории крупных и небольших городов Приднепровского промышленного региона Украины. Данные были сгруппированы по годам, этапам интенсивности техногенеза и территориям (рис. 1). Выборочные совокупности имеют неодинаковый объем, как правило, статистически неоднородны.



а)



■ Количество частных значений

б)

Рис. 1. Схема расположения изученных территорий (приднепровский промышленный регион, Украина): а) расположение изученных объектов; б) общее количество данных

В статье приведены результаты моделирования деградации грунтов, относящихся к формации внеледниковых четвертичных субаэральные лёссовых отложений, внутриформационная изменчивость которой определяется региональными факторами инженерно-геологических условий. В техногенном (предельном) состоянии происходит стирание различий между свойствами лёссовых и палеопочвенных горизонтов формации. Формирование новой области состояний свойств изначально неоднородного в стратиграфо-генетическом отношении массива имеет черты сходства с перемешиванием.

2. Методы исследований

Привлекались методы стохастического и индуктивного математического моделирования. Выполнялся первичный статистический, корреляционный, регрессионный, авторегрессионный виды анализа данных. Для изучения особенностей деградации микроструктуры и описания изменчивости среды, процессов привлекались методы фрактального анализа. При выполнении исследований привлекалось программное обеспечение STATISTICA, Фрактан (trial-версии) и авторское программное обеспечение (Коряшкина Л.С. [1]).

Анализ изменений уровня режима водоносного горизонта эолово-делювиальных отложений, оказывающего наибольшее влияние на деградацию просадочных свойств, включал анализ траекторий приращений глубин залегания. По материалам режимных наблюдений за положением уровня подземных вод было выполнено построение траекторий приращений. Тенденции к повышению уровня водоносного горизонта эолово-делювиальных отложений проявлялись неодинаково. Амплитуды декадных колебаний в годовом цикле не превышали 0,3 м, на склонах амплитуды достигали 0,5–1,1 м. В зависимости от геоморфологической зональности, длительности и интенсивности техногенеза траектория приращений отличается особенностями распределения и выраженностью тенденций, сезонных и многолетних циклов, что влияет на скорость деградации просадочных свойств.

С позиций инженерной геологии важно создать модель геологической среды и модель процесса деградации свойств. Важно установить неявные причинно-следственные связи и закономерности, скрытые в ретроспективных данных, для уточнения физической модели процесса деградации. Индуктивное моделирование выполнялось методом группового учета аргументов, что позволило выполнить анализ и прогноз свойств и состояния лёссовых грунтов в процессе их деградации. В качестве входных параметров рассматривали значения природной влажности w , пределов пластичности w_L , w_p плотности грунта ρ и частиц ρ_s , содержания фракций, пространственные координаты, время. Входные параметры описывают состояние грунта в определенных координатах. В качестве выходных рассматривали прогнозные значения механических свойств: относительную просадочность, модуль и величины деформации, угол внутреннего трения, удельное сцепление. Выходные параметры характеризуют вероятные механические реакции грунта в опре-

деленный момент времени, в тех же координатах. Модели связи входных и выходных параметров, при таком подходе, описывают процесс деградации во времени, пространстве и при изменении состояния грунта.

В настоящей работе описываются результаты моделирования процесса деградации просадочности. Под деградацией понимается упорядоченный в пространственно-временных координатах процесс разрушения грунта. Известно, что в городах техногенное воздействие является многофакторным, имеет разную природу. Предполагается, что в этих условиях разрушение структуры просадочного грунта (лёсса) выражается в изменениях гранулометрического состава, физического состояния и, как результат, приводит к изменению прочности и деформируемости. Этот процесс сопровождается разрушением стохастических связей между показателями состояния и прогнозных величин механических реакций.

Для решения задачи структурно-параметрической идентификации был применен метод группового учета аргументов (МГУА, автор А. Г. Ивахненко [2–4]). Получены модели функциональной зависимости величины относительной просадочности ε_{sL} от координат, года определения и физических свойств массива просадочных грунтов. Адекватная модель, определяющую зависимость физико-механических свойств от показателей физических свойств, имеет наименьшую сложность и может использоваться для краткосрочного прогнозирования реакций массива. Анализ вида, сложности моделей, состава факторных переменных, выраженности детерминированной компоненты позволяет выполнить содержательную интерпретацию особенностей процесса, установить закономерности деградации грунтов при техногенезе в различных региональных условиях.

3. Результаты моделирования

Для получения эпигнозных моделей просадочности (1956–2007 годов) на территории одной из природно-техногенных систем (ПТС) регионального уровня были обработаны данные о свойствах лёссов и палеопочвенных горизонтов, данные о временной изменчивости уровня режима подземных вод. Общее количество монолитов составило 3104. Был получен временной ряд средних значений (обобщенных оценок свойств формации в зоне аэрации) как подсистемы ПТС. Ранее было показано, что общей тенденцией застроенных территорий является ухудшение во времени зависимости от плановых пространственных координат [5].

Выполнив построение траектории приращений уровня подземных вод в координатах «глубина уровня подземных вод в соседние моменты времени»

$$\Delta h = f(x_t, x_{t+1}),$$

получили траекторию, отражающую динамику уровня водоносного горизонта на протяжении двухлетнего цикла (рис. 2). Тенденция к повышению уровня устойчива, выражена во всех рядах. Соответствуют природной норме закономерности временной динамики уровня режима на водораздельных пространствах, с относительно низкой плотностью сооружений (рис. 2б). Выраженность циклов указывает

на устойчивость сезонной компоненты даже в условиях устойчивого повышения уровня подземных вод на водораздельных пространствах. Длительное техногенное воздействие приводит к сглаживанию цикличности, что можно трактовать как искажение симметрии [6, 7], признак перехода к хаотическому (техногенно-нарушенному) состоянию. Такой режим характеризуется плохой выраженностью и сдвигом (искажением) циклов.

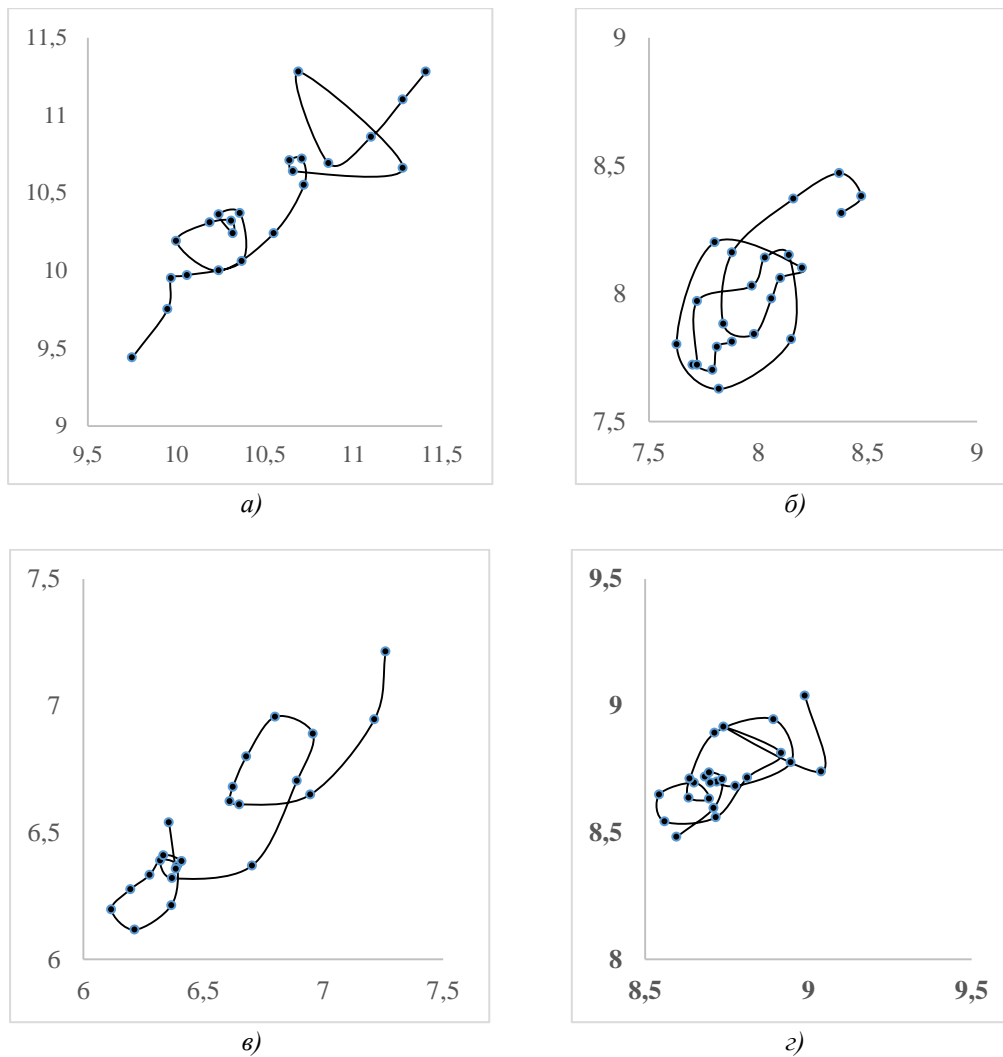


Рис. 2. Траектории изменений положения уровня в скважинах, расположенных на водоразделе (скв. 2) и вблизи тальвега (скв. 1): а) траектория приращений уровня подземных вод в скважине 1 в период 1986-1987 годов; б) то же, в период 1991-1992 годов; в) траектория приращений уровня подземных вод в скважине 2 в период 1986-1987 годов; г) то же, в период 1991-1992 годов

Ранговая корреляция показателей свойств грунтов зоны аэрации, относящихся к одной формации, показала, что содержание отдельных фракций, величины модуля деформации E , МПа, удельного сцепления C , МПа, угла внутреннего трения FI , не только изменяются во времени, но и коррелируют с годом определения (рис. 3). Некоторые показатели не теряют связи с глубиной отбора z , т. е. имеют смысл пространственных переменных. Множественная регрессия (метод пошаговой регрессии) показала, что выбор зависимой переменной, как правило, определяет состав независимых переменных, включаемых в уравнение.

Данные были упорядочены во времени (рассчитаны средние в году) и по абсолютной отметке глубины отбора. Анализ связей между входными и выходными переменными выполнялся в следующем порядке. Устанавливался набор переменных, включенных в модель зависимости прогнозного показателя от показателей состава и состояния грунта. Эти переменные рассматривались как факторные.

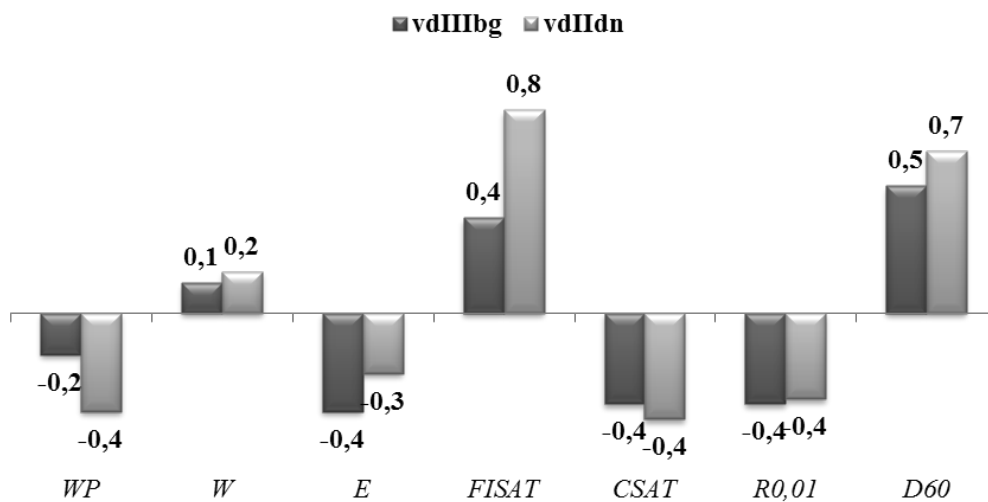


Рисунок 3. Коэффициенты ранговой корреляции показателей свойств бугского $vdIIIbg$ и днепровского $vdIIIn$ горизонтов с годом определения (г. Днепропетровск, 1983 — 1993 гг.). Здесь: $-0,2$ — коэффициент ранговой корреляции; $vdIIIbg$ — стратиграфо-генетический индекс; WP — нижний предел пластичности; W — природная влажность, д, ед.; E — модуль деформации; $FISAT$ — угол внутреннего трения грунта в состоянии полного водонасыщения, град.; $CSAT$ — удельное сцепление, МПа, грунта в состоянии полного водонасыщения; $R0,01$ — содержание частиц размером $0,005-0,01$ мм; $D60$ — эффективный диаметр частиц, мм

Выполнялся анализ сложности моделей связи, важности детерминированной компоненты. Сложность модели оценивалась по числу и виду компонентов, порядку модели. Важность факторной переменной оценивали по знаку и величине коэффициента при линейной компоненте связи между зависимой и данной независимой переменной. Уравнения не приводятся из-за большого числа компонентов.

Находилась фракция гранулометрического состава, которая в наибольшей степени определяет значения относительной просадочности на данной ступени давления (табл.). Анализ результатов показал, что на ступени давления, приблизительно равного давлению, создаваемому в природных условиях (0–0,05 МПа), гранулометрический состав не является детерминированным фактором деградации просадочности, так как ни одна из фракций не была выбрана как детерминированная факторная переменная. Чем больше давление, тем больше размер разрушаемых агрегатов, которые являются детерминированной факторной компонентой модели деградации просадочных свойств лёссового грунта. Такой вывод можно сделать, проанализировав выбор в качестве факторной переменной относительной просадочности размер фракций, в наибольшей степени влияющий на значения относительной просадочности, в определенном диапазоне нагрузок.

Таблица. Коэффициенты при линейных компонентах факторных переменных моделей деградации просадочности лёссовидных суглинков (Днепропетровск, 1956–2007 годы).

P , МПа	R	Коэффициенты при линейных компонентах факторных переменных						
		t	w_L	w_p	w	ρ_s	ρ	R
0–0,05	0,25–0,1	–	0,001	+	–	–	–	+
	0,05–0,01	0,001	–	–	–	+	0,0017	–
	0,01–0,005	+	0,01	–	0,005	+	+	–
0,05–0,1	1,0–0,5	–	–	–	+	+		0,107
	0,5–0,25	–	+	256,42	91,846	0,005	1,173	1,807
	0,25–0,1	+	+	–	–	0,006	–0,048	0,028
	0,1–0,05	0,867	24,604	+	0,135	0,032	–0,016	0,986
	0,05–0,01	+	–	–0,053	–	+	0,002	+
0,25–0,3	1,0–0,5	–	–	+	0,177	+	0,001	0,006
	0,5–0,25	+	–	0,07	–0,831	0,004	+	0,002
	0,25–0,1	–	0,03	0,006	0,378	–	0,006	–

Примечания: (+) — факторная переменная нелинейная; (–) переменная не является факторной; P — интервал давления, МПа, в которой определялась относительная просадочность, ε_{SL} , д.ед.

Факторные переменные: R — процентное содержание гранулометрической фракции, мм; t — фактор времени, год; w_L, w_p — пределы пластичности, д. ед.; ρ_s — плотность частиц грунта, г/см³; w — природная влажность, д. ед.; ρ — плотность грунта, г/см³.

Анализ знаков сложных нелинейных моделей зависимости относительной просадочности от координат и факторов состояния грунта показал, что в интервале нагрузок, близких к пределу структурной прочности лёссов (0,05–0,1 МПа), на про-

тяжении изучаемого времени, происходило слабое увеличение содержания частиц размером 0,25–0,1 мм. Одновременно происходил распад агрегатов размером 0,5–0,25 и 0,1–0,05 мм. На ступени давления, соответствующему величинам дополнительных давлений (0,3 МПа) происходит распад агрегатов размером 0,5–0,25 мм.

Анализ величин коэффициентов при линейной факторной переменной «содержание фракции» показал, что линейный характер связей лучше выражен на ступени давления 0,05–0,1 МПа. Линейная связь лучше проявляется в интервале размеров макро- и микроагрегатов [8, с. 146] в лёссах: от 1 до 0,05 мм. Не линейна связь приращений фракции 0,05–0,01 мм и деградации просадочности. Такие особенности указывают на связь деградации и изменений агрегатного состава [8, 9].

Факторной переменной деградации палеопочвенных горизонтов чаще выбиралась плотность частиц грунта ρ_s . Линейная связь между содержанием песчаных и пылеватых фракций и деградацией просадочности устанавливается в том же, общем для формации, интервале давлений 0,1–0,3 мПа. Изменения микроагрегатного состава палеопочвенных горизонтов выражены хуже, чем в лёссовидных суглинках. В процессе деградации просадочности рост содержания глинистых частиц сопровождается уменьшением содержания фракции 0,01–0,005 мм. Линейные связи с годом определения подтверждены только для значений модуля деформации E , тенденции не соответствуют изменениям показателей механических свойств просадочных лёссовидных суглинков.

4. Выводы

По результатам индуктивного математического моделирования процесса деградации методом группового учета аргументов получены нелинейные динамические модели, отражающие сопряженные изменения гранулометрического состава, физических и механических свойств грунтов во времени в зоне влияния городов.

Тенденции изменения агрегатного состава лёссовидных суглинков и палеопочвенных горизонтов в процессе деградации просадочности разные, что является следствием перехода к хаотическому состоянию — перемешиванию.

Литература

- [1] Мокрицкая Т. П., Коряшкіна Л. С. Факторы и модели деградации просадочности // Вісник Національного гірничого університету. 2013. № 4. С. 5–12.
- [2] Ивахненко А. Г., Мюллер Й. Ф. Самоорганизация прогнозирующих систем. — Киев : Техніка, 1985.
- [3] Ивахненко А. Г., Юрачковский Ю. П. Моделирование сложных систем по экспериментальным данным. — М. : Радио и связь, 1987.
- [4] Грешилов А. А., Стакун В. А., Стакун А. А. Математические методы построения прогнозов. — М. : Радио и связь, 1997.

- [5] *Mokritskaya T. P., Shestopalov V. M.* Features of conduct ground loess formation by technogenetic impact on the example Dnipropetrovsk // (EngeoPro-2011) International conference under the aegis of IAEG, Moscow, Russia, September 6-8, 2011, P. 561–564.
- [6] *Никольчев Е. В.* Идентификация динамических систем на основе симметрий реконструированных аттракторов. — М. : МГУП, 2010.
- [7] *Никольчев Е. В.* Моделирование систем с хаотической динамикой на основе оценки слабого нарушения симметрий в реконструированных аттракторах // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 4. С. 227. (<http://www.science-education.ru/118-14319>)
- [8] *Ларионов А. К., Приклонский В. А., Ананьев В. П.* Лессовые породы СССР и их строительные свойства. — М. : Госгеолтехиздат, 1959.
- [9] *Russels A. R.* A compression line for soils with evolving particle and pore size distributions due to particle crushing // *Geotechnique Letters*. 2011. Vol. 1. No. 1. P. 5–9. (doi: 10.1680/geolett.10.00003)

Автор:

Мокрицкая Татьяна Петровна, доктор геологических наук, доцент, доцент кафедры геологии и гидрогеологии, заместитель декана геолого-географического факультета Днепропетровского национального университета имени Олеся Гончара

Chotic Models Degradation Loess Rocks

T. P. Mokritskaya

Dnipropetrovsk national university Oles Honchar
36 K. Marcs Ave., Dnipropetrovsk, 49044 Ukraine
e-mail: mokritska@i.ua

Abstract. Analysis of temporal variability the components of the geological environment in the territories of cities was performed. The models of the degradation of the indexes of loess in time in the vadose zone were created. The results indicate the exist elements of chaos in dynamics properties of soils and groundwater in the city.

Keywords: loess, degradation, chaos.

Reference

- [1] Mokritskaya T. P., Koriaschkina L. S. (2013) Degradation in loesses: factors and models. *Visnik Nacionalnogo girnichogo universitetu*, 4, 5–12. (In Rus)
- [2] Ivahnenko A. G., Mjuller J. F. (1985) *Samoorganizacija prognozirujushhih sistem*. Kiev: Tehnika.
- [3] Ivahnenko A. G., Jurachkovskij Ju. P. (1987) *Modelirovanie slozhnyh sistem po jeksperimentalnym dannym*. Moscow: Radio i svjaz.
- [4] Greshilov A. A., Stakun V. A., Stakun A. A. (1997) *Matematicheskie metody postroenija prognozov*. Moscow, Radio i svjaz.
- [5] Mokritskaya T. P., Shestopalov V. M. (2011) Features of conduct ground loess formation by technogenetic impact on the example Dnipropetrovsk. (EngeoPro-2011). International conference under the aegis of IAEG, Moscow, Russia, 561–564.
- [6] Nikulchev E. V. (2010) *Modelirovanie sistem s haoticheskoy dinamikoj na osnove ocenki slabogo narushenija simmetrij v rekonstruirovannom attraktore*. Moscow: MGUP.
- [7] Nikulchev E. V. (2014) Modelirovanie sistem s haoticheskoy dinamikoj na osnove ocenki slabogo narushenija simmetrij v rekonstruirovannyh attraktorah. *Sovremennye problemy nauki i obrazovanija*, 4, 227. (<http://www.science-education.ru/118-14319>)
- [8] Larionov A. K., Priklonskij V. A., Ananev V. P. (1959) *Lessovye porody SSSR i ih stroitel'nye svojstva*. Moscow: Gosgeoltehzdat.
- [9] Russels A. R. (2011) A compression line for soils with evolving particle and pore size distributions due to particle crushing. *Geotechnique Letters*, 1(1), 5–9. (doi: 10.1680/geolett.10.00003)